

# **PROTOTIPO DE UNA FUENTE VARIABLE DE ALTO VOLTAJE PARA UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE SÓLIDOS POR ASPERSIÓN ELECTROSTÁTICA**

## *HIGH VOLTAGE VARIABLE SOURCE PROTOTYPE FOR AN ELECTROSTATIC SPRAY SOLIDS RECOVERY SYSTEM*

**Juan Ricardo Damián Zamacona**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, México  
*ricardo.damian@icat.unam.mx*

**José Castillo Hernández**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, México  
*jose.castillo@icat.unam.mx*

**Gabriel Ascanio Gasca**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, México  
*gabriel.ascanio@icat.unam.mx*

**Recepción:** 29/octubre/2020

**Aceptación:** 4/diciembre/2020

### **Resumen**

En este trabajo, se presenta el prototipo de una fuente ajustable de alto voltaje con rango de operación de 1500 a 10,000 volts. La fuente se desarrolló para su aplicación en aspersión electrostática, que corresponde con una técnica de separación de partículas sólidas que están inmersas en líquidos. En el trabajo se presentan los subsistemas involucrados que se consideraron en el diseño. La topología empleada para la construcción de la fuente ha dado buenos resultados y permite ajustar el voltaje a través de un potenciómetro digital. En el trabajo se considera el diseño de un transformador elevador con núcleo de ferrita, así como el diseño de una configuración push-pull para su excitación, apoyado en un circuito de modulación por ancho de pulso. Las mediciones fueron hechas mediante el uso de un multímetro y una punta atenuadora.

**Palabras Clave:** Aspersión, fuente, oscilador, partícula, tensión.

### **Abstract**

*In this work, the prototype of an adjustable high voltage source is presented with operating range of 1500 to 10,000 volts. The source was developed for application*

*in electrostatic spraying, which corresponds to a separation technique of solid particles that are immersed in liquid. The work presents the subsystems involved that were considered in the design. The topology used for the construction of the source has given good results and adjusts the voltage across a digital potentiometer. The work considers the design of a step-up transformer with a ferrite core, as well as the design of a push-pull configuration for its excitation, supported by a pulse width modulation circuit. Measurements were made by using a multimeter and an attenuator probe.*

**Keywords:** *Oscillator, particle, source, spray, tension.*

## **1. Introducción**

En el campo de la industria farmacéutica y alimentaria se ha estado experimentando en procesos que permitan la separación de partículas suspendidas en mezclas líquida. Entre estos, se puede mencionar la separación de partículas mediante el uso de campos electrostáticos, en lugar de las técnicas convencionales como la evaporación, en la cual se eleva la temperatura de la mezcla que se desea separar y tiene como consecuencia una degradación del producto que puede llegar a ser considerable. La técnica que se menciona se conoce como aspersion electrostática. En este proceso, la mezcla está sometida a una alta presión y se libera a través de una esprea, o un conducto reducido, que permite generar la aspersion del líquido. En estas condiciones, se dice que la mezcla está atomizada porque genera un flujo de pequeñas gotas que contienen las impurezas que se desean eliminar. Este flujo, pasa a través de una cámara que está sometida a un alto voltaje, el cual produce un campo electrostático entre sus paredes y un electrodo. El campo, junto con un secado por aire, permite separar las impurezas de la mezcla [Gañan, 2006], [Jaworek, 2007], [Nguyen, 2016], [Xiang, 2010]. En este trabajo, se trata el diseño de una fuente de alto voltaje para su aplicación en un sistema de recuperación de sólidos por aspersion electrostática. Para su desarrollo, se debe puntualizar que la intensidad de campo eléctrico que se requiere depende del tamaño de partículas que se desea atraer. En nuestro caso, se solicitó desarrollar una fuente de al menos 5000 volts. Por otra parte, el diseño de las

fuentes en esta área en particular no es de dominio público por ser secreto industrial; sin embargo, hay trabajos que tratan sobre el desarrollo de fuentes de alto voltaje en lo general [Al-mamoori, 2019], [Dwivedi, 2010], [Park, 2020]. Por otro lado, existen fuentes comerciales de alto voltaje que se pueden conseguir en el país, sin embargo, éstas son de voltaje fijo como las empleadas para polarizar algún sistema láser. Las fuentes variables de alto voltaje son equipos de importación y caros, que pueden estar sobredimensionadas o incluir opciones de operación que no son útiles para la aplicación. Tomando en cuenta esto, se propuso realizar un diseño a la medida.

Como el equipo es un prototipo que se va a usar en un laboratorio, se consideró diseñar una fuente ajustable en el rango de 1500 a 10,000 volts que permita a los usuarios ajustar la intensidad del campo eléctrico que se genera. De esta forma, la fuente permite trabajar con la captura de partículas de diferentes dimensiones. El tamaño de las partículas que se está considerando, según los especialistas que solicitaron el desarrollo, se ubica dentro de un intervalo amplio que va desde nanómetros hasta varios micrómetros.

El diseño de la fuente está basado en un transformador elevador que opera a una frecuencia de 40,000 hertz, que alimenta a una red de Cockcroft–Walton. Por la frecuencia que maneja, el transformador requiere de un núcleo de ferrita. Usualmente, los transformadores que se venden o se mandan a fabricar en el país están diseñados para una frecuencia de 60 hertz. Estos transformadores se diseñan con base en núcleos de tipo laminado. Los núcleos de ferrita pueden trabajar a frecuencias superiores de 20,000 hertz y son muy compactos. Si bien, hay industrias en el extranjero que fabrican y venden transformadores bajo especificación, se prefirió hacer su diseño y armado.

## **2. Métodos**

En la figura 1, se muestra el diagrama del sistema que está conformado por un control basado en un microcontrolador, una fuente lineal ajustable, un puente H y un arreglo de multiplicadores de voltaje. Un diagrama más detallado, se puede apreciar en la figura 2 en donde se presentan los diferentes bloques y su

interconexión. En la imagen, se observa un transformador reductor convencional como parte de una fuente de polarización de corriente directa. Esta fuente, produce dos voltajes constantes de 5 y 15 volts, así como un voltaje variable de 1.25 a 12.5 volts que se ajusta a través de un potenciómetro digital. Cabe mencionar que este potencial permite establecer la salida de la fuente de alta tensión. El microcontrolador, se encarga del potenciómetro digital y la pantalla LCD en donde se presenta la información de la fuente. El transformador elevador se excita con un modulador de ancho de pulso, o PWM, conectado a un puente H. El lado secundario del transformador se conecta a un multiplicador de voltaje formado por una red de dobladores de tensión.

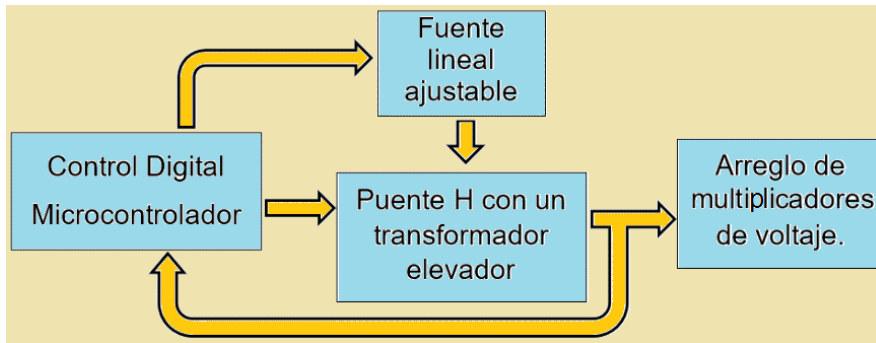


Figura 1 Diagrama simplificado de la fuente de alto voltaje.

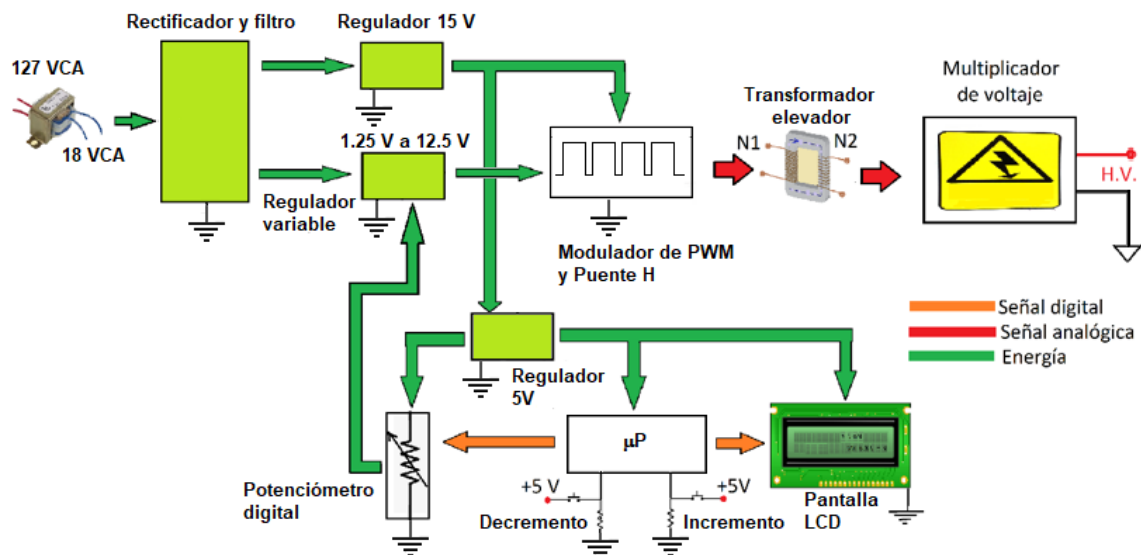


Figura 2 Diagrama a bloques de la fuente de alto voltaje.

### Fuente de polarización

La fuente de polarización está compuesta de un arreglo convencional. En figura 3, se muestra sólo la etapa de rectificado y filtrado. En el diseño se consideró además los reguladores 7805, 7815 y el LM317. En la imagen, el voltaje  $V_x$  representa la tensión que se debe aplicar en la entrada de los reguladores. Su valor crítico se elige a partir del voltaje mínimo que requiere el regulador 7815. Este corresponde con 17 volts que están compuesto por el valor nominal del regulador más el voltaje de *drop-out*.

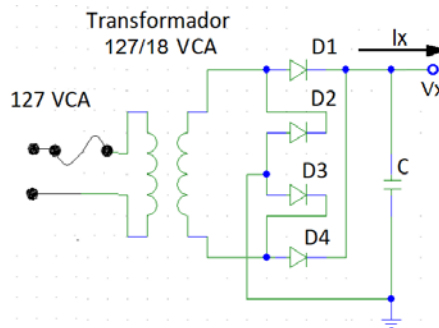


Figura 3 Fuente primaria de voltaje.

La caída en el puente rectificador llega a ser de 2 volts cuando los diodos conducen una corriente promedio de un amperio. Con un transformador de 18 volts rms en el secundario, el voltaje pico mínimo es de 22.9 volts, tomando en cuenta una fluctuación del 10 % en la línea. Si a este valor se resta el voltaje del puente, se obtienen 20.9 volts. Por tanto, con un rizo de 2 volts, la tensión llega a 18.9 volts que está por encima de los 17 volts que requiere el 7815. El voltaje de rizo es un parámetro que interviene además en la selección del capacitor de filtrado. El capacitor se puede calcular con base en la ecuación 1.

$$C = \frac{I_x}{2f_{Linea}V_{rizo}} \quad (1)$$

En ecuación 1, la corriente  $I_x$  corresponde con la que demanda el sistema. Durante las pruebas, se midió un valor alrededor de 300 mA, sin embargo, para el diseño se fijó en 500 mA. Considerando  $f_{Linea} = 60$  Hz y  $V_{rizo} = 2$  V, el valor calculado fue de 2083  $\mu$ F, por tanto, se eligió un valor comercial de 2200  $\mu$ F.

Por último, cabe mencionar que de ser necesario el transformador se puede sustituir por uno de mayor valor. Esto puede ocurrir en zonas donde el voltaje nominal es de 110 V rms, sin embargo, es importante puntualizar que el voltaje nominal en donde se planea usar el equipo es mayor de 120 V rms.

### Modulador de ancho de pulsos y puente H

En la figura 4, se muestra el diagrama electrónico del modulador de PWM y su conexión con el puente H. El modulador de PWM, está apoyado en el integrado UC3525 que produce en sus terminales 11 y 14 dos trenes de pulsos desfasados 180°. Este circuito se usa en fuentes conmutadas bajo configuración push-pull.

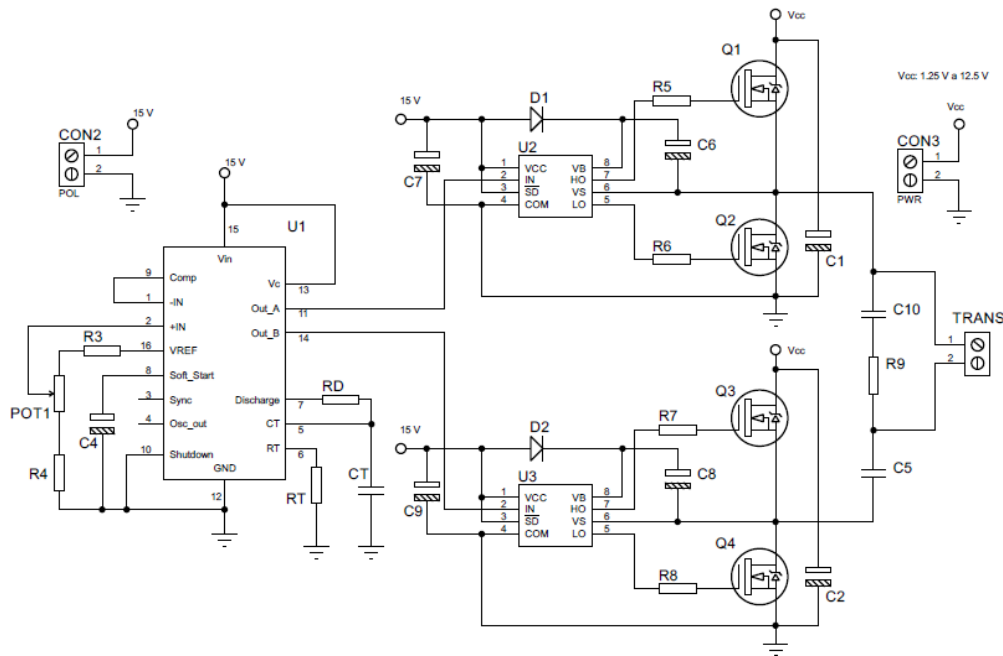


Figura 4 Modulador de ancho de pulso y puente H.

Los pulsos que produce el circuito controlan la activación de las ramas de un puente H. El límite máximo del ciclo de trabajo es del 49 %, de tal forma que los pulsos generados no se traslapan. La frecuencia y el límite del ciclo de trabajo se pueden establecer a partir de las gráficas que ofrece la hoja de especificaciones. Fijando  $CT = 10\text{nF}$ ,  $RT = 3\text{k}\Omega$  y  $RD = 100\ \Omega$ , el circuito produce una frecuencia de 41.6 kHz con ciclo de trabajo máximo del 37.5 %. En el diseño se usó resistencias de película

metálica con una tolerancia del 1 % y el capacitor se eligió de tipo monolítico. Por su parte, cada rama del puente H, está formada por un arreglo de transistores MOSFET IRF540, junto con su circuito de activación IR2104 [International Rectifier, 2004]. Este circuito se caracteriza porque permite manejar arreglos de medio puente que se pueden alimentar hasta con 600 V, presenta un tiempo de encendido de 680 ns y un tiempo de apagado de 150 ns. Es capaz de manejar corrientes de activación de 130 mA como fuente y 270 mA como sumidero. El circuito se polariza con 15 V y tiene un tiempo muerto de 520 ns para la conmutación de los transistores. En la figura 5 se presenta la imagen del impreso del modulador con el puente H.



Figura 5 Circuito impreso del arreglo.

El voltaje  $V_{CC}$ , que alimenta al puente H, lo produce el regulador LM317. De esta forma, la amplitud de la señal de cada rama se ajusta a partir de este elemento. El puente se conecta al transformador elevador y en conjunto producen un voltaje diferencial similar al que se indica en la figura 6, en donde su amplitud depende del voltaje  $V_{CC}$  y la relación de transformación.

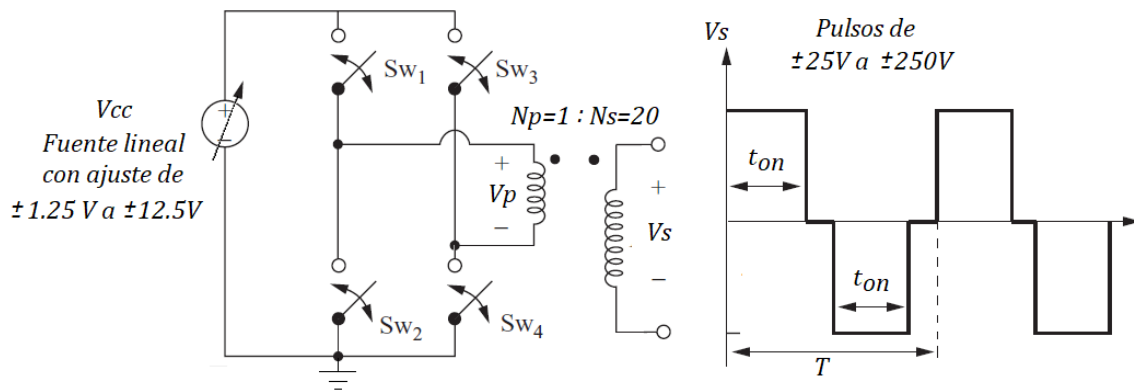


Figura 6 Puente H conectado a un transformador de tipo elevador.

Por ejemplo, si  $V_{CC}$  es igual a 12.5 volts y el transformador presenta una relación 1:20, entonces el voltaje pico del lado secundario es de 250 volts. Además de esto, en la imagen se aprecia el ancho de pulso  $ton$  y el tiempo de estado cero entre pulsos, que son producto del ciclo de trabajo.

### Transformador elevador

El transformador se diseñó y fabricó con base en un núcleo de ferrita E34/14/9 de material  $P$  [Magnetics, 2017]. El núcleo tiene un área transversal  $A_e$  de  $0.000088\text{m}^2$ . Para el diseño se consideró una frecuencia  $f_s$  de 40 kHz, una densidad de flujo  $B$  de 0.160 T, un voltaje en el primario  $V_P$  de 12.5 V y voltaje en el secundario  $V_S$  de 250 V. El número de vueltas se calculó a partir de las ecuaciones 2 y 3 que el fabricante ofrece en su manual.

$$N_p = \frac{V_P}{4 \cdot B \cdot A_e \cdot f_s} \quad (2)$$

$$N_s = \frac{V_S}{V_p} N_p \quad (3)$$

El número exacto de vueltas fue de 5.55 para el primario y de 111 en el secundario. Por esta razón se propuso en la fabricación 5 vueltas para  $N_p$  y 110 para  $N_s$ , lo que da una relación final de transformación 1 a 22. Si bien, la relación esperada era de 20, se prefirió dar un margen adicional, considerando además que el voltaje al final se puede ajustar con la fuente  $V_{CC}$ . Con esta relación, el voltaje pico del secundario se puede ajustar en un intervalo de 27.5 a 275 volts, cuando el voltaje del LM317 varía de 1.25 a 12.5 volts. En la figura 7 se presenta una foto del transformador ya terminado.

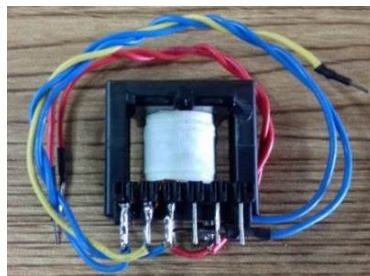


Figura 7 Transformador elevador.



## Multiplicador de voltaje

Las terminales del secundario se conectan con un multiplicador de voltaje formado por arreglos de capacitores y diodos. La celda básica es un doblador de voltaje y se presenta en la figura 8.

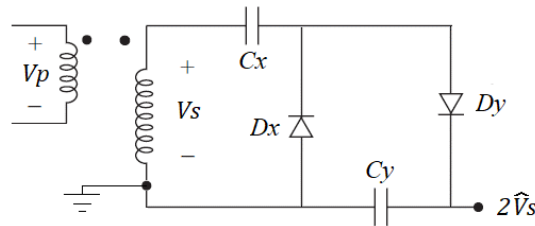


Figura 8 Doblador de voltaje.

Esta configuración se conoce como Cockcroft-Walton y se enseña en los cursos de dispositivos electrónicos. En este circuito, el capacitor se carga con un voltaje constante de 2 veces el voltaje pico del secundario. En el diseño se debe considerar la frecuencia superior de 40 kHz. El diodo de rectificación convencional no trabaja a esta frecuencia. Es por esto, que es necesario usar diodos de recuperación rápida que soporten un voltaje de inversa de dos veces el voltaje pico del transformador. Se espera que el transformador alcance un máximo de 275 V, por tanto, es necesario que el diodo soporte 550 V. Para tal propósito, se usó el diodo MUR160 que soporta hasta 600 volts, maneja una corriente promedio de 1 A y ofrece tiempos de recuperación inversa de 75 ns. Para los capacitores, se consideraron componentes de 100 nF y 1000 V. La red de multiplicadores se armó primero en una tarjeta prototipo considerando 38 etapas, aunque después de las pruebas, se propuso hacer el impreso con 25 etapas, ver figuras 9 y 10.

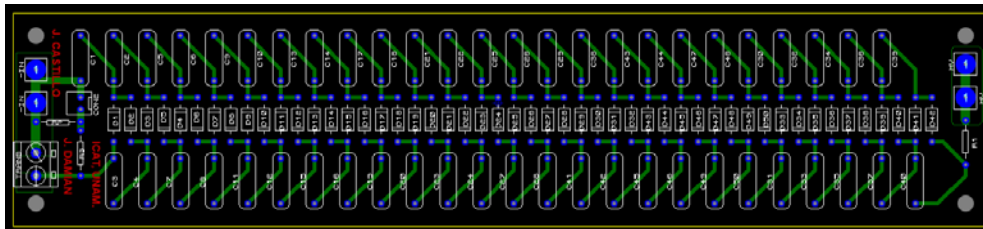


Figura 9 Circuito impreso del multiplicador de voltaje.

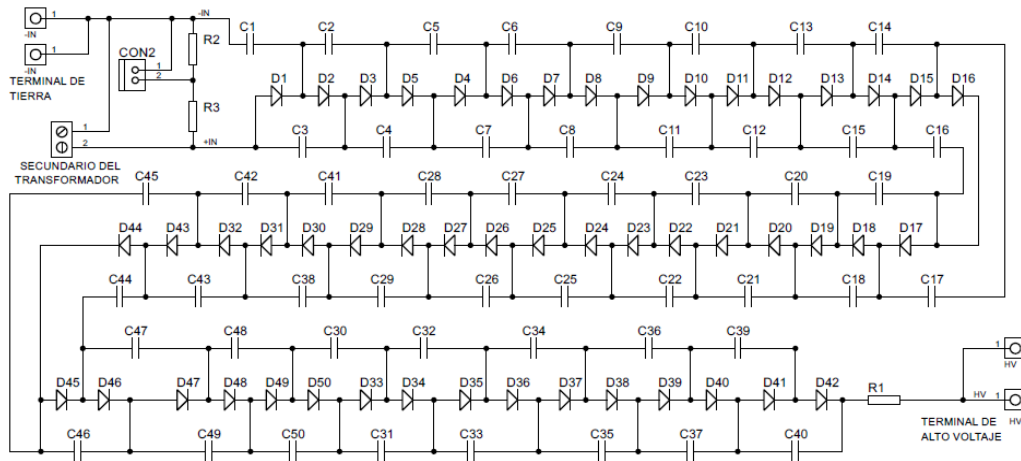


Figura 10 Multiplicador de voltaje.

Con la red de multiplicadores se espera alcanzar un voltaje de 13,000 volts. En principio se requieren de menos etapas, pero se decidió agregar un poco más para asegurar el voltaje. Cabe mencionar que la fabricación del impreso está en espera, sin embargo, en los resultados se presentan las evidencias que se obtuvieron con la red armada en una tarjeta prototipo.

### Sistema digital

El sistema digital que controla del alto voltaje utiliza un microcontrolador ATmega328 embebido en un módulo Arduino. Este sistema interactúa con el potenciómetro digital X9C103 y con un LCD 1602<sup>a</sup> (Figura 11). El potenciómetro, controla la corriente de la terminal de ajuste de un regulador LM317. De esta forma se controla el voltaje  $V_{CC}$  y por tanto la salida de alto voltaje.

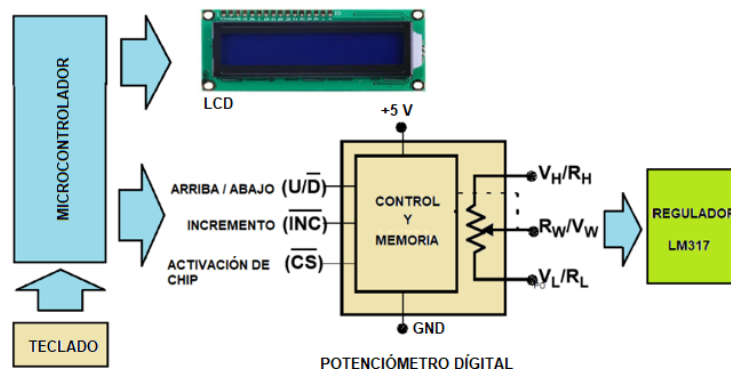


Figura 11 Etapa digital del sistema.

En un regulador LM317, entre la terminal de salida  $V_o$  y la terminal de ajuste  $Adj$ , se presenta un voltaje constante de 1.25 volts, ver figura 12. Este voltaje genera una corriente  $I_{REF}$  que está en función de la resistencia  $R_1$  de acuerdo con la ecuación 4.

$$I_{REF} = \frac{V_{REF}}{R_1} \quad (4)$$

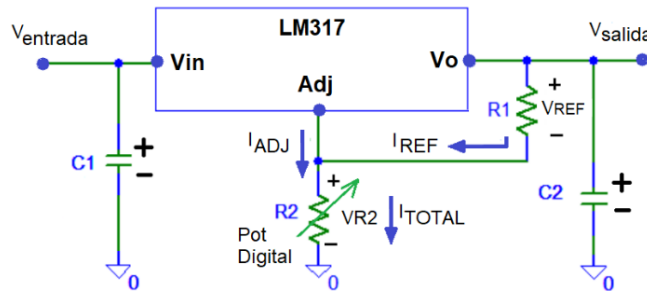


Figura 12 Regulador variable.

Por otro lado, también se tiene la corriente  $I_{ADJ}$  que drena desde la terminal  $Adj$  y es del orden de 50  $\mu$ A. Esta corriente se suma con la de referencia y circula a través del potenciómetro  $R_2$  hasta tierra.

La resistencia  $R_1$  se elige normalmente de 220  $\Omega$ . Este valor produce una corriente de 5.68 mA que es bastante mayor que  $I_{ADJ}$ . Por tanto, la corriente que fluye a través de  $R_2$  es igual a la corriente de referencia. Tomando esto en cuenta, el valor de  $R_2$  se puede calcular a partir de la ecuación 5, de donde se obtiene un valor de 2 k $\Omega$  para una salida de 12.5 V. El circuito X9C103 es un potenciómetro digital de 10 k $\Omega$  y se consideró para el diseño, aunque claro está, otra posibilidad puede ser el X9C502 de 5 k $\Omega$ .

$$R_2 = R_1 \left( \frac{V_o}{V_{REF}} - 1 \right) \quad (5)$$

### 3. Resultados

Para comprobar el funcionamiento de la fuente, se utilizó una punta atenuadora de alto voltaje que se conecta a un multímetro. La sonda permite medir hasta 40,000 volts con una atenuación de 1000. El multímetro y la sonda son de la marca Fluke. En la figura 13, se presenta funcionando un arreglo formado por 38 dobladores de

voltaje que se conectaron al secundario del transformador. Este fue el prototipo preliminar antes de diseñar el circuito impreso. En la imagen se observa que el multímetro marca 5.010 volts que corresponden con 5010 volts. En la figura, también se aprecia la señal que se midió en el secundario del transformador, usando el osciloscopio.

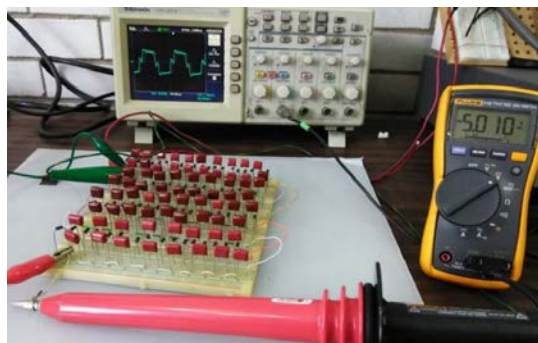


Figura 13 Instrumentos de medición y arreglo experimental.

En la figura 14, se presenta un acercamiento de su pantalla, en donde se aprecia las características de la señal. La escala de tiempo marca  $5 \mu\text{s}$ , en tanto que, la de voltaje indica 50 V. El periodo de la señal es de  $22.5 \mu\text{s}$  aproximadamente, que equivale con una frecuencia de 44.4 kHz. El voltaje promedio pico de la señal está alrededor de 65 V. El tiempo de estado cero entre pulso y pulso se estima de 2 microsegundos. A partir del voltaje pico y considerando 38 etapas, en donde cada una dobla el voltaje, da como resultado 4980 volts y corrobora la lectura del multímetro.

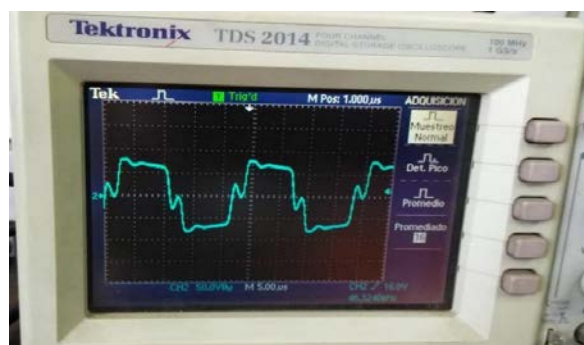


Figura 14 Toma de la pantalla del osciloscopio.

En la figura 15, se presenta la respuesta del transformador sin estar conectado con la red de dobladores de voltaje. En esta imagen, la escala de voltaje es de 10 volts por cuadro y los transitorios de la señal resaltan más, sin embargo, permite apreciar un poco mejor el estado cero entre pulsos.

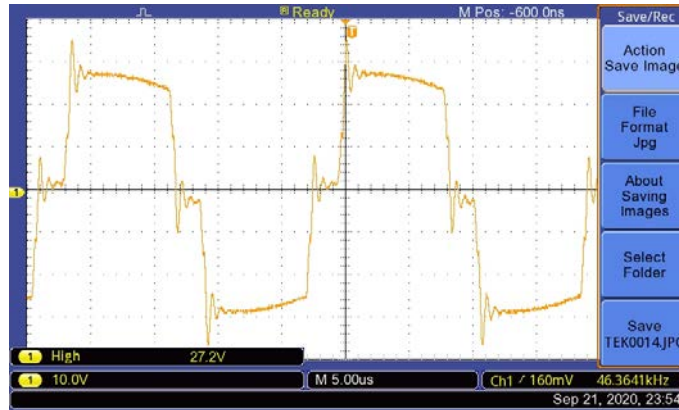


Figura 15 Respuesta del transformador cuando  $V_{CC}$  es de 1.25 V.

Para tomar esta imagen, se ajustó el voltaje  $V_{CC}$  en 1.25 V. A partir de esto y tomando en cuenta que, la relación de transformación es de 22, el voltaje del secundario se espera de 27.5 V. En la imagen, el osciloscopio marca un potencial en alto de 27.2 V. Además de esto, en el oscilograma, la frecuencia indica un valor de 46.36 kHz. En la figura 16, el voltaje  $V_{CC}$  se ajustó en 12.5 V y se obtuvo un voltaje de 260 V. La escala de voltaje en este caso es de 50 V, la referencia del canal está alrededor de -140 V y sólo se presenta el lóbulo positivo de la señal.

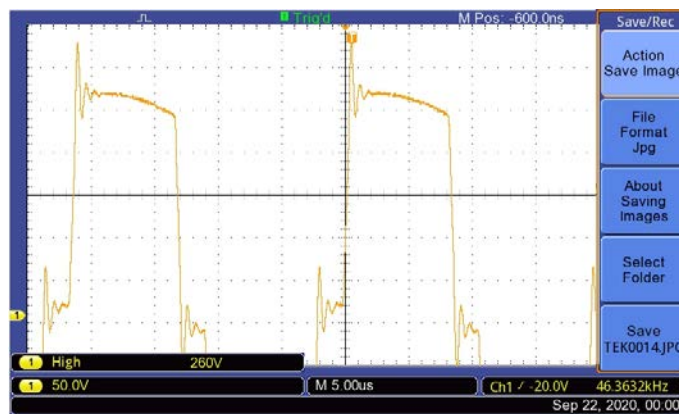


Figura 16 Respuesta del transformador cuando  $V_{CC}$  es de 12.5 V.

Por otra parte, en la figura 17 se presenta la pantalla LCD del circuito que se usó para medir el potencial  $V_{CC}$  y el voltaje generado en el primer multiplicador. Con esta información se calculó una estimación del voltaje final. Este circuito se apoyó en divisores de tensión y el convertidor analógico-digital del Arduino. En la pantalla se despliega el valor de  $V_{CC}$  y la estimación de alto voltaje.



Figura 17 Despliegue de  $V_{CC}$  y la estimación del voltaje de salida.

Por último, en la tabla 1 se presenta los valores medidos del voltaje  $V_{CC}$ , el voltaje pico en el secundario y el alto voltaje que se generó. La tabla se limitó a 5000 volts debido a que, en el prototipo montado en la figura 13, se generaron arcos cuando se estaba probando el circuito de la figura 12. Los valores de la tabla se midieron con un multímetro, el osciloscopio y la punta atenuadora.

Tabla 1 Salidas de voltaje en las diferentes etapas del sistema.

$V_{CC}$ (V)	$V_s$ (V)	$HV$ (V)
1.25	27.8	2100
1.51	33.09	2515
1.80	39.53	3005
2.09	46.21	3512
2.38	52.65	4002
2.71	59.4	4520
3.06	66.5	5000

#### 4. Discusión

Las pruebas que se presentan se realizaron en la fase de diseño. Se elaboraron los circuitos impresos y se mandaron a fabricar. Actualmente se tiene terminado el módulo de PWM y el puente H. Se espera en breve la tarjeta de los dobladores de voltaje. En el caso del sistema del microcontrolador, se está haciendo más pruebas

y modificaciones de su diseño. Cabe mencionar que el potenciómetro permitió ajustar de forma sencilla la salida de la fuente, sin embargo, tal vez se sustituya por uno de valor menor. Algo importante que se está evaluando es el sensado directo del alto voltaje para tener una medida real y no una estimación.

Durante las pruebas, fue posible elevar el voltaje hasta 10,000 volts, sin embargo, se generaron arcos entre componentes a partir de los 7000 volts. Por esta razón, sólo se presenta los resultados hasta 5000 volts. Los arcos se deben a la forma en la que está armado el circuito en la tableta. En el diseño final se planea usar alguna capa aislante como barniz para transformadores o algún tipo de resina. El voltaje mínimo que se reporta fue de 2100 volts, sin embargo, esto se debió a la cantidad de etapas del multiplicador. Como se indicó, la tarjeta impresa usa un número menor de etapas, que se redujo de 38 a 25. Aun así, se espera un voltaje de 1300 volts. De ser necesario, en el multiplicador se pueden reducir las etapas para alcanzar un valor menor.

El desempeño del transformador muestra coherencia con su diseño y se corrobora a partir de las pruebas realizadas. Si bien el sistema se probó con una cámara en donde se tenían contenidas partículas de unicel, aun falta hacer pruebas en el sistema real que está en desarrollo.

## **5. Conclusiones**

El desempeño de la fuente, en su etapa de diseño, ha cumplido en lo general con las expectativas planteadas. Si bien el voltaje mínimo que se reporta es de 2100 volts, se espera que sea menor con la tarjeta final del multiplicador. Además de esto se puede proponer reajuste al diseño para lograr un potencial menor; sin embargo, lo cierto es que esto no es necesario porque las partículas a separar en muchos procesos requieren de voltajes mayores de 2000 volts para ser atraídas.

## **Agradecimientos**

Se agradece al Mtro. Salvador Rodríguez Lozano y a la Mtra. Iliana Rodríguez Lozano por su apoyo en la fabricación y ensamblado de los circuitos impresos que se diseñaron durante este proyecto.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Al-mamoori Dalya; Neda, Omar; Al-Tameemi, Zaid; Alobaidi, Ali; Aljanabi, Mohanad. (2019). Generating High Voltage DC with Cockcroft-Walton Voltage Multiplier for Testing Locally Assemble Electric Field Sensor. 10.1088/1757-899X/518/4/042019.
- [2] Dwivedi, C.K. and Daigvane, M.B. (2010). Multi-purpose Low Cost DC High Voltage Generator (60kV Output), Using Cockcroft-Walton Voltage Multiplier Circuit. *International Journal of Science and Technology Education Research*. 2. 241 - 246. 10.1109/ICETET.2010.150.
- [3] Gañan-Calvo Alfonso, López Herrera José and Riesco-Cuecat Pascual. (2006) The combination of electrospray and flow focusing Cambridge University Press, *J. Fluid Mech* vol. 566, pp. 421–445. doi:10.1017/S0022112006002102.
- [4] International Rectifier. Use Gate Charge to Design the Gate Drive Circuit for Power MOSFETs and IGBTs. Application Note AN-944. 5 pages. October 2004.
- [5] Jaworek, A. (2007). Review: Micro and nanoparticle production by electrospraying, Elsevier, *Powder Technology* 176, pp. 18–35.
- [6] Magnetics. (2017). Magnetics 2017 Ferrite Cores Catalog: <https://www.mag-inc.com/Design/Technical-Documents/Ferrite-Core-Documents>.
- [7] Nguyen Duong Nhat; Clasen Christian and Van den Mooter Guy. (2016). Review: Pharmaceutical Applications of Electrospraying. Elsevier, *Journal of Pharmaceutical Sciences* 105, pp. 2601-2620.
- [8] Park, S., Yang, J. and Rivas-Davila, J. (2020). A Hybrid Cockcroft–Walton/Dickson Multiplier for High Voltage Generation, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 3, pp. 2714-2723, doi: 10.1109/TPEL.2019.2929167.
- [9] Xiang Li, Nicolas Anton, Cordin Arpagaus, Fabrice Belleteix, Thierry F. Vandamme. (2010). Nanoparticles by spray drying using innovative new technology: The Büchi Nano Spray Dryer B-90, Elsevier, *Journal of Controlled Release* 147, 304–310.